



超级电容产业周报

2026年9月 第 2 期

- 朔州雁门智慧网联储能电站项目(1标段)招标公告
- 热烈祝贺！飞毛腿能源河南火储调频(浸没式)项目正式开工
- 华能蒙东公司全超级电容储能调频关键技术达国际领先水平
- 韩研股份荣获第二十六届中国专利优秀奖
- 行业首条！富华德~神州天玑15000F锂碳超级电容生产线实现量产突破
- 中天超容中天科技申请储能控制方法相关专利，实现多储能协同，提稳增效延寿命、
- Nature重磅首发：电池+超级电容分工合作：河马算法调度的光伏储能系统，暂态时间狂砍50%！
- 颠覆性突破！全球首款柔性水泥基超级电容器问世：会发电的“墙面”让建筑变身巨型电池

朔州雁门智慧网联储能电站项目(1标段)招标公告

朔州雁门智慧网联储能电站项目(1标段)招标公告

(招标编号: E14060000G3001864001)

招标项目所在地区: 山西省朔州市朔州经济开发区

一、招标条件

本朔州雁门智慧网联储能电站项目(招标项目编号: E14060000G3001864001), 已由朔州经济开发区行政审批局批准, 项目资金来源为自有资金及银行贷款, 招标人为朔州雁门智慧新能源发展有限公司。本项目已具备招标条件, 现进行 公开招标。

二、项目概况和招标范围

项目规模: 项目占地5亩, 总建筑面积500平方米。主要建设总功率为25MW/31.5MWh混合储能电站, 拟配置超级电容储能10MW/1.5MWh+锂电池储能15MW/30MWh, 其中布设2套超级电容预制舱和3套锂电池储能预制舱, 配电及操控室等

招标内容与范围: 本招标项目划分为1个标段, 本次招标为其中的:

001朔州雁门智慧网联储能电站项目:

(1) 本项目计划建设本工程包含总配置容量不低于25MW/31.5MWh的混合储能系统(其中超级电容储能的装机容量10MW/1.5MWh, 磷酸铁锂储能的装机容量15MW/30MWh, 以及配套的电气、控制系统等)、35kV开关站(35kV开关柜、SVG、接地变小电阻、二次系统、备用变), 场地土方平整、周边围墙、厂区管网道路、设备基础及项目涉及的所有子项工程的施工图设计、项目工程施工、可靠性试运行及质量保证期内的服务、建设管理、项目工程保险; 以及项目所涉及的相关协调工作(其中规划许可、开工许可、建设用地手续办理, 承包人配合上述工作), 经批准的水土保持、环境保护方案的实施, 消防报建及验收、组织协调并网验收、并网调试、启动及试运行、工程移交生产预验收、竣工验收等配合工作。

(2) 包含总功率为25MW/31.5MWh混合储能电站(以及配套的电气、控制系统等), 电气设计、制造采购、出厂试验、包装、供货、运输、就位和安装、调试、验收、试运行、工程移交。

(3) 项目总投资为: 8500万元。

三、投标人资格要求

001朔州雁门智慧网联储能电站项目:

3.1 投标人为中华人民共和国境内合法注册的独立企业法人或其他组织, 具有独立承担民事责任的能力。

3.2 本次招标要求投标人须同时具备以下资质:

(1) 设计资质: 具备有效的工程设计综合甲级资质或工程设计电力行业乙级及以上资质或工程设计电力行业(送电工程、变电工程)专业乙级及以上资质;

(2) 施工资质: 具备有效的电力工程施工总承包贰级及以上资质和承装(修、试)电力设施许可证二级及以上资质, 有效的安全生产许可证; 在人员、设备、资金等方面具有相应的施工能力。

(3) 投标人拟派项目经理须具备有效的机电工程专业壹级注册建造师资格,同时具有有效的安全生产考核合格证B证,且未担任其他施工工程项目的项目经理;

(4) 投标人拟派施工负责人须具备有效的机电工程专业壹级注册建造师资格,同时有效的安全考核合格证B证;

(5) 设计负责人:具有有效的注册电气工程师(发输变电)注册证书或电力工程相关专业中级工程师及以上职称;

注:项目经理与设计负责人或施工负责人可为同一人。

3.3财务要求:经会计师事务所或者审计机构审计的(2025年度)财务审计报告。

3.4类似业绩:投标人自2022年1月1日至今至少有一项35kV及以上电压等级的变电站EPC总承包业绩或者一项35kV及以上电压等级的变电站施工业绩和35kV及以上电压等级的变电站设计业绩。

3.5未列入“国家企业信用信息公示系统”严重违法失信企业名单,未列入“信用中国”、“中国执行信息公开网”网站失信被执行人名单。

3.6单位负责人为同一人或者存在控股、管理关系的不同单位,不得参加同一标段投标或者未划分标段的同一招标项目投标。

3.7本次招标接受联合体投标。

(1) 联合体数量不超过2个;

(2) 联合体投标的应签订联合体协议,明确联合体牵头人,约定各方拟承担的工作和责任;

(3) 由同一专业的单位组成的联合体,按照资质等级较低的单位确定资质等级;

(4) 联合体各方不得再以自己的名义单独投标或参加其他联合体在本招标项目中投标,出现上述情况者,其投标和与此有关的联合体的投标均将被拒绝。

本标段 允许 联合体投标。

四、招标文件的获取

001朔州雁门智慧网联储能电站项目:

获取时间: 2026-08-13 09:30 -- 2026-08-18 09:30

获取方法: 本项目投标人须办理CA数字证书,在公共资源交易市场主体库

(<http://jyzt.sxzwfw.gov.cn/>)进行主体库注册,主体库注册完成后凭借CA数字证书登录朔州市公共资源电子交易系统(<http://124.167.17.28:8090/gb-web/#/login>),通过系统指引下载获取本项目招标文件,此为获取本项目招标文件的唯一途径

五、投标文件的递交

001朔州雁门智慧网联储能电站项目:

递交截止时间: 2026-09-02 09:30:00

递交方法: 系统上传

递交地址：投标人须使用CA数字证书在朔州市公共资源电子交易系统
<http://124.167.17.28:8090/gb-web/#/login>上传加密投标文件，上传的加密投标文件须自行解密
验证，投标文件递交截止时间后将无法上传投标文件，远程开标需提前检测好电脑环境

六、开标时间及地点

001朔州雁门智慧网联储能电站项目：

开标时间：2026-09-02 09:30:00

开标方式：网上开标

七、提交投标保证金的形式

本项目可以采用现金保证金或银行保函、保证保险、担保机构保函、电子保函等非现金交易担保方式提交投标保证金

八、提出异议的渠道和方式

提出异议的渠道：

1. 通过全国公共资源交易平台（山西省·朔州市）(<http://szggzy.shuozhou.gov.cn/>)
2. 纸质方式提出

接收异议的联系人：秦晓义

电话：0350-7655300

九、其他公告内容

1. 本次招标公告同时在《山西省招标投标公共服务平台》和《全国公共资源交易平台（山西省·朔州市）》上发布；
2. 评标方式：本项目评标方法采用晋建市规字〔2023〕209号文的综合评估法。

定标方式：招标人依据评标委员会提交的评标报告和推荐的中标候选人确定排名第一的中标候选人为中标人。

十、监督部门

本招标项目的监督部门为朔州经济开发区管理委员会。

电 话：13734174407。

电子邮件：117766358@qq.com。

十一、联系方式

招 标 人：朔州雁门智慧新能源发展有限公司

地 址：朔州经济开发区

联 系 人：张泽平

电 话：18503497084

电子邮件：18905333183@189.cn

招标代理机构：沃尔德建设咨询集团有限公司

地 址：山东省济南市历下区舜风路101号齐鲁文化创意基地四号楼3楼东

联 系 人：李善杰、范玉淼

电 话：18053136870

电子邮件：wedzx9008@126.com

招标人或招标代理机构主要负责人（项目负责人）：（签章）

招标人或招标代理机构：（签章）



信息来源：

<https://sxbid.com.cn/f/new/notice/1/ebff677f33a34b1ca0866e43c1234fad#1>

【行业动态】

热烈祝贺！飞毛腿能源河南火储调频(浸没式)项目正式开工

2026年8月30日，飞毛腿能源河南火储调频（浸没式）项目开工仪式正式举行，公司与火电厂、设计单位、施工单位、监理单位等相关领导及参建人员齐聚现场，共同见证项目破土动工。

该项目的启动，标志着公司在“火电+储能”协同领域迈出坚实一步，也是公司盘活存量资产、培育增长新动能、探索轻资产运营模式的具体体现。



一、行业发展背景与技术价值

在新型电力系统加快构建的背景下，国内新能源装机规模持续扩容，电网功率波动加剧、调频调节压力显著增大。火储联合调频依托电化学储能毫秒级极速响应优势，与火电机组协同配合、精准执行AGC调度指令，可快速平抑电网功率波动，有效解决传统火电机组调节速度慢、控制精度低、跟踪偏差大等痛点，大幅提升煤电灵活调节能力，已成为当前煤电灵活性改造、新型电力系统建设的重要落地路径。

二、项目配置与建设概况

飞毛腿能源河南火储联合调频项目采用浸没式储能方案，场站侧部署浸没式锂电池储能舱、超级电容储能舱、变流升压一体机等核心装备，设备配置齐全、系统架构完善。项目覆盖方案设计、土建施工、设备安装、系统接入、分系统调试、消防审查、运维培训等全产业链闭环服务，搭建完善质量安全管控体系，保障系统安全稳定运行。当前项目正抢抓工期，计划年底前实现并网投运。

三、核心浸没式液冷技术优势

本项目核心差异化亮点为**搭载自研浸没式液冷104S电池插箱，采用行业前沿的PACK液冷+静态单相全浸没散热方案。**该技术将电池模组完全浸泡在高稳定绝缘冷却液中，依托底部液冷板完成高效换热，搭配BMS联动智能热管理系统与电芯自适应控制系统，实现精细化智能温控，将电芯工作温度恒定在15℃-35℃，精准控制PACK级温差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 、簇级温差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 。同时采用浸没液与冷却液双隔离设计，搭配IP67防护等级、无挥发免维护运行特性，结合物理隔绝与数智化多重告警监控，**从源头杜绝短路、热扩散等安全隐患，大幅提升系统稳定性，延长电池循环寿命，有效降低储能全周期使用成本。**



以鹤壁火储调频项目为起点，公司加速从储能设备制造商向“制造+投资+运营+运维”一体化的储能资产综合服务商转型。该项目是此次战略转型的首次实战，不仅能够沉淀运营经验、验证收益模型，还将持续挖掘“火电+储能”协同价值，把项目实践形成可复制的技术与运营能力，助力公司进一步拓宽储能调频应用场景，走好储能产业融合发展的道路！

信息来源：https://mp.weixin.qq.com/s/9Ui_KCb116fgyYRzFqH_qw

【行业动态】

华能蒙东公司全超级电容储能调频关键技术达国际领先水平

近日，华能蒙东公司伊敏电厂钛基全超级电容储能耦合火电机组调频关键技术及示范应用成果通过中国电力企业联合会鉴定，整体技术达到国际领先水平。

该成果基于华能伊敏电厂“基于睿渥技术的新型全超级电容储能调频系统研制与示范应用”科技项目，聚焦火电机组调频提质与新型电力系统建设需求，首创**钛基全超级电容储能系统及配套核心技术，建成全球首个16兆瓦级全超级电容储能火电机组调频示范项目**，核心性能指标经第三方权威检测表现优异。目前，成果已形成覆盖核心专利、软件著作权、国际与国家标准的完整自主知识产权体系。

信息来源：

https://www.chng.com.cn/detail_yxxw/-/article/2vMCKgtLDZqb/v/1322119.html

【行业动态】

韩研股份荣获第二十六届中国专利优秀奖

近日，广东韩研活性炭科技股份有限公司（以下简称“韩研股份”）再添国家级重磅荣誉。依托**蜂窝活性炭制造领域**自主研发的核心技术成果（专利号：ZL202210425824.8），

公司荣获第二十六届中国专利优秀奖。

韩研深耕活性炭材料主业，在长期的生产与项目落地过程中，直面蜂窝活性炭现存的成品品质痛点。为从根源上优化材料品质，公司立足材料端需求，自主研发专属配套生产装备，以装备端的原创技术突破反哺材料，实现蜂窝活性炭成品品质的实质性提升。

附件 5

第二十六届中国专利优秀奖项目名单

(535 项)

序号	专利号	专利名称	专利权人	发明人
104	ZL202210425824.8	蜂窝状活性炭表面整平设备	广东韩研活性炭科技股份有限公司	陈永强、李国辉、陈永强、李国辉、陈永强、李国辉
105	ZL202210425824.8	蜂窝状活性炭表面整平设备	广东韩研活性炭科技股份有限公司	陈永强、李国辉、陈永强、李国辉、陈永强、李国辉
106	ZL202210425824.8	蜂窝状活性炭表面整平设备	广东韩研活性炭科技股份有限公司	陈永强、李国辉、陈永强、李国辉、陈永强、李国辉

第二十六届中国专利奖 获奖名单

中国专利优秀奖是中国专利领域的国家级权威奖项，由国家知识产权局和世界知识产权组织共同主办，专门授予技术创新突出、市场效益显著的发明专利或实用新型专利。该奖每年评选一次，评审标准涵盖专利质量、技术先进性及产业化运用成效，含金量极高。此次公司专利荣获该奖项，是国家对研发团队坚持自主创新、攻克技术难题的最高肯定。这份来自“国家队”的权威认证，印证了公司从技术研发到专利落地产业化的完整创新链条，充分彰显企业的核心竞争力。

此次斩获中国专利优秀奖，标志着韩研这条以材料为本、自研配套装备、反向赋能产品品质的创新路径，获得国家级层面的充分认可。未来，韩研股份将继续锚定活性炭材料主赛道，坚持材料引领、装备工艺协同创新，持续打磨高品质活性炭产品，为环保行业提供更加稳定可靠的材料解决方案。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/H4jWeu6-YkYNOLcyFLUc8A>

【行业动态】

行业首条！富华德~神州天玑

15000F锂碳超级电容生产线实现量产突破

近日，富华德~神州天玑自主建设的**15000F锂碳超级电容生产线**实现量产突破。该产线为2020年投线产线，目前年产能可达到300万件，标志着大容量锂碳超级电容规模化制造迈

出关键一步。

长期以来，大容量锂碳超级电容电芯受制于材料体系、工艺控制和生产一致性等难题，稳定批量供货能力一直是行业瓶颈。面向市场对大容量、长寿命、高功率储能器件的迫切需求，富华德~神州天玑持续开展技术攻关，完成产线工艺优化、设备调试与全流程品控体系搭建，顺利打通大容量锂碳超级电容规模化制造链路。

据介绍，本次量产的**软包单颗超级电容器能量突破60Wh，单颗电容能量达到行业最高水平。单体电芯级能量密度范围可达到110Wh/kg-140Wh/kg，内阻降至0.5毫欧以下，大倍率充放电工况下的发热表现更加优异。**尤为值得一提的是，该产线产品已通过公安部枪击试验，在极端冲击下不起火、不爆炸，安全性能得到权威验证。**产品在保持高能量密度的同时，兼顾超级电容高功率、长寿命的固有特性，实现了功率性能与储能能力的有效平衡。**

作为专注锂碳超级电容研发与产业化的企业，富华德~神州天玑坚持以自主创新驱动产品落地。本次产线投产实现了从技术研发到规模化量产的完整跨越，为超级电容的产业化应用提供了坚实的产能保障。富华德~神州天玑相关负责人表示，这条行业首条产线的稳定投产，是公司在大容量超级电容产业化道路上的一个里程碑。未来，公司将依托成熟量产产线，持续优化生产工艺、稳步释放产能，不断丰富大容量储能产品矩阵，为下游客户提供高性能锂碳超级电容产品，助力新型储能器件产业高质量发展。

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/O5scvgUcG4gMu3r2W8Cfvg>

【行业动态】

中天超容中天科技申请储能控制方法相关专利 实现多储能协同，提稳增效延寿命

8月28日消息，国家知识产权局信息显示，**中天超容科技有限公司、江苏中天科技股份有限公司申请一项名为“耦合电池与超级电容的储能控制方法及相关设备”的专利。**申请公布号为CN122620561A，申请号为CN202610659869.X，申请公布日期为2026年8月21日，申请日期为2026年5月13日，发明人邢建华、杨益、周建明、徐国光、罗欣怡、严高飞、施鑫鑫，专利代理机构深圳市赛恩倍吉知识产权代理有限公司，专利代理师饶智彬，分类号H02J3/32、H02J7/34、H02J7/82。

专利摘要显示，本申请提供一种耦合电池与超级电容的储能控制方法及相关设备，方法包括：基于获取的电网调度指令和储能系统的运行状态数据，确定功率分配策略，功率分配

策略以多参数加权构成的综合参量最小为约束条件；基于功率分配策略，确定电池系统对应的第一移相角和超级电容系统对应的第二移相角；基于第一移相角和第二移相角分别确定DC-DC变换电路的第二端口的第一PWM信号和第三端口的第二PWM信号；基于第一移相角和第一PWM信号对第二端口的开关阵列进行控制，基于第二移相角和第二PWM信号对第三端口的开关阵列进行控制。**本申请可实现多储能单元协同运行，提升系统稳定性、能效与使用寿命。**

信息来源：

https://www.sohu.com/a/1068668635_122014422?scm=10001.7746_13-119000.0.0-0-0-0-0.0&spm=smcpc.channel_354.block3_32_P7Ovbu_1_fd.33.1787912944345AHAlagO_7746

【前沿技术】

Nature重磅首发：电池+超级电容分工合作： 河马算法调度的光伏储能系统，暂态时间狂砍50%！ scientific reports

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾

[nature](#) > [scientific reports](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Open access](#) | Published: 16 March 2026

Enhanced power management in PV-Integrated hybrid energy storage systems using fuzzy 2DOF-PI control optimized by hippopotamus algorithm

[Hossam Kotb](#) , [Ahmed G. Khairalla](#), [Hesham B. ElRefaie](#) & [Kareem M. AboRas](#)

[Scientific Reports](#) **16**, Article number: 9200 (2026) | [Cite this article](#)

一、研究背景与动机

在全球向可持续、环保能源结构转型的大背景下，可再生能源（RES）装机持续攀升，但其固有的波动性与间歇性给电网稳定和能量管理带来了严峻挑战。直流微电网（DC microgrid）因其转换效率高、传输损耗低、与可再生能源和储能系统（ESS）集成简便等优势，成为解决这一问题的重要途径；而混合储能系统（HESS）则是直流微电网的核心部件。

单一电池储能存在明显短板：能量密度高但响应速度慢，在功率需求剧烈变化的环境下

承受较大电流应力和热退化，寿命和性能都会受损。将电池与超级电容（SC）组合是经典方案——SC 凭借高功率密度和快速响应承担短时功率波动，电池承担长时能量供给，二者互补可显著延长电池寿命。

在功率分配策略上，现有方法分为三大类：

1.优化类方法：动态规划+神经网络、GA 等，性能近优但需要大量训练数据或计算量大；

2.滤波类方法：将 HESS 输入电流分为高频（HF，给 SC）和低频（LF，给电池）分量。LTI 低通滤波器简单但牺牲效率；小波变换效率高但计算复杂度大；不理想的滤波器可能导致 SC 过充/过放。自适应滤波+规则控制可缓解 SOC 越限，但滤波器频繁失效会降低系统效率；

3.规则类方法：计算量小、适合实时应用，分为有限状态机（FSM）和模糊规则系统两类。

论文通过一张详尽的文献对比表（Table 1，涵盖 12 篇近期 FLC 应用于 HESS 的研究）指出既有模糊逻辑方案的共性问题：规则集静态、依赖专家经验、缺乏优化整定、多数采用 1DOF 结构、部分方案未考虑 SC 或未与优化算法结合、对比基准不足等。

本文出发点：提出一种将模糊逻辑监督层与二自由度 PI（2DOF-PI）控制器相结合的新型控制架构（Fuzzy 2DOF-PI），并首次将 Hippopotamus Optimization（HO，河马优化算法，2024 年提出）引入直流微电网领域进行控制器参数整定，实现对光伏-电池-SC 全主动 HESS 的功率管理与稳定性增强。

二、系统架构与核心设计

2.1 系统总体拓扑

系统为独立（standalone）光伏系统 + 并联全主动 HESS：

- PV 阵列：经 MPPT 控制器与 DC-DC 变换器接入中央直流母线，最大化能量采集；
- 电池组：经独立的双向 Buck-Boost 变换器接入母线，承担低频/长时能量需求；
- 超级电容组：经独立的双向 Buck-Boost 变换器接入母线，吸收高频功率波动；
- 直流负载：恒定约 500 W；
- 功率管理系统（PMS）：统筹发电、储能与用电三者间的能量平衡。

采用并联主动拓扑的理由：各储能单元可独立控制、储能单元电压不直接制约母线电压、固有容错能力更强，从而提升微电网可靠性与稳定性。

2.2 各组件建模

光伏电池模型：采用业界最常用的五参数模型，考虑光生电流、二极管电流、并联漏电流、串联电阻等，输出电流由式(1)–(4)精确计算（含串/并联电池数 N_s / N_p 、理想因子 A 、温度等变量）。仿真用光伏板参数：峰值功率 120 W（MPP: 7.1 A @ 17 V），开路电压 21 V，短路电流 8 A；温度系数：短路电流 +0.052%/°C，开路电压 -0.358%/°C。

超级电容模型：基于 Stern 模型，电压表达式为：

$$V_{SC} = \frac{N_s Q}{N_p C_{cell} T} - R_{SC} I_{SC}$$

电池模型：采用以 SOC 为状态变量的通用电池模型（支持铅酸等四种电池类型），等效为受控电压源+恒定内阻（式(8)–(9)），含极化电压和指数区特性。参数：标称电压 24 V，内阻 0.017 Ω ，额定容量 14 Ah。

三、核心算法/方法（论文核心创新）

3.1 功率管理控制策略

控制目标是减轻电池在充放电循环中的应力、延长其寿命，并将电池 SOC 始终维持在安全范围内。核心功率平衡关系为：

$$\Delta I = I_{pv} - I_{load} = I_B + I_{SC}$$

频率解耦与补偿机制（区别于简单滤波方案的关键设计）：

直流母线电压均值与参考值 V_{ref} 比较后，误差送入控制器，输出为 HESS 总需求电流；

总参考电流经**低通滤波器（时间常数 0.015 s）**分解为低频分量 I_{LF_ref} （电池承担）和高频分量 I_{HF_ref} （SC 承担）；

电池支路额外引入速率限制器（rate limiter）——论文明确指出这是为了适配电池比 SC 慢的动态特性并缓解电流应力，保证电池只响应缓变的负载需求；

关键补偿环节：由于电池响应慢，实际电池电流会跟不上参考值。控制策略将这部分未补偿功率：

$$P_{B_UC} = (I_{HF_ref} + I_{B_err}) \cdot V_B$$

折算为 SC 的参考电流：

$$I_{SC_ref} = \frac{P_{B_UC}}{V_{SC}} = (I_{HF_ref} + I_{B_err}) \cdot \frac{V_B}{V_{SC}}$$

即由 SC 实时“兜底”电池的跟踪误差，实现精确的功率分配；

5. 电池与 SC 支路的电流误差分别送入模糊控制器和 2DOF-PI，生成占空比 D_{Bat} 与 D_{SC} ，经 PWM 驱动各自的双向变换器开关 ($S1/S2$ 与 $S3/S4$)。

3.2 模糊逻辑控制器 (FLC)

- 两个输入：误差 e 及其变化率 Δe ；一个输出：控制量；
- 每个输入/输出隶属度函数分为七个语言类别：NL、NM、NS、Z、PS、PM、PL；
- 49 条模糊规则

(Table 4) 同时评估偏差大小与误差收敛速率，动态调整占空比；

- 推理采用 Mamdani 法，聚合用最大值法，去模糊化用重心法 (centroid)；
- 优势：无需系统的精确数学模型或传递函数，对不精确输入具有天然容错性，适合非线性、时变的功率变换场景。

3.3 2DOF-PI 控制器

传统 PI 只有一个自由度，无法同时优化设定值跟踪与扰动抑制。2DOF-PI 增加了一个设定值加权系数 b ：

$$U(s) = K_p \left[(bR(s) - Y(s)) + \frac{1}{T_i s} (R(s) - Y(s)) \right]$$

- b

仅作用于比例通道的参考项——调节 b 可以独立整定设定值跟踪性能而不影响扰动抑制 (积分通道保持完整的误差反馈)；

- 三个可优化参数： K_p 、 K_I (或 T_i)、 b ，且论文明确指出这种 2DOF 结构在现有 HESS 模糊-PI 设计中极少被考虑 (已有方案几乎都是 1DOF)。

3.4 Hippopotamus Optimization (HO) 算法

HO 是 2024 年提出的群体智能算法，模拟河马的群体组织与防御行为，候选解 (河马) 按式(17)初始化后经三个阶段迭代更新：

- 阶段 1 (河流/池塘中的位置更新，探索)：以 CF 选择占主导地位的“头河马”

(最优解) 保护群体; 被逐出群体的公河马需寻找建立自身主导地位的方式 (式(18)–(19)) , 雌性与幼年河马的位置受随机向量 h_1 / h_2 的影响;

- 阶段 2 (防御捕食者, 探索): 面对捕食者 (次优解) , 河马正面迎击并发声驱赶; 采用 Lévy 飞行随机向量增强全局搜索多样性 (式(20)–(21)) , θ 在 2–4 之间变化;

- 阶段 3 (逃离捕食者, 开发): 受袭后逃向最近水域, 在逐步收缩的局部边界 $[LL_local, UL_local]$ 内进行精细的局部搜索 (式(22)–(23)) , 随迭代进行收缩以加速收敛。

优化配置与目标函数: 种群 30, 迭代 100 次, 与 PSO、TLBO 保持相同预算以公平对比;

目标函数 J 为三大关键控制变量误差平方积分 (ISE, 式(25)) :

$$J = \int_0^{T_{sim}} [e_{V_{dc}}^2(t) + e_{I_{SC}}^2(t) + e_{I_B}^2(t)] dt$$

其中三项分别为归一化后的母线电压误差、SC 电流误差和电池电流误差——分别对应直流母线稳定、暂态功率补偿、电池电流调节三大性能指标。

3.5 优化结果

HO 最终适应度值 $5307.7 < TLBO\ 5368.8 < PSO\ 5531.7$, 证明 HO 整定收敛更快且解的质量更高。整定后的最优参数 (Table 5) 涵盖母线、SC、电池三套控制器共 15 个参数 (KP、KI、b、K1、K2) 。

四、实验/仿真验证与结果分析

仿真环境为 MATLAB/Simulink 2024b, 作者明确声明仿真在理想化条件下进行 (不含变换器开关损耗、测量噪声、通信延迟、SOC 估计误差和器件老化) , 目的是在相同假设下对控制策略做公平对比。共设计四种工况场景:

场景 1: 光照阶跃变化

光照序列: $200 \rightarrow 400\ (0.5\ s) \rightarrow 700\ (1.0\ s) \rightarrow 500\ W/m^2\ (1.5\ s)$, 负载恒定 500 W, 电池初始 SOC 50%;

光照不足时电池补足差额; 光照峰值期 (1.0–1.5 s) 光伏发电超过负载, 电池功率变负 (充电) ; 1.5 s 后电池重新放电;

对比结果: F2DOF-PI-HO 的电池功率峰值超调较经典 PI 降低约 20%, SC 功率超调降低约 23%; 光伏功率暂态时间缩短约 40%, 负载功率暂态时间缩短约 50%。FPI-TLBO

和 FPI-PSO 相对经典 PI 有一定改善但明显落后。

场景 2：负载阶跃增加

SC 功率超调：经典 PI 175 W > FPI-PSO 165 W > FPI-TLBO 135 W > F2DOF-PI-HO 125 W；

电池功率超调：经典 PI 70 W → HO 方案仅 15 W（降低近 80%）；

暂态时间：SC 功率 0.036 s → 0.023 s，电池功率 0.028 s → 0.013 s；

所有方法 SOC 均维持在 50% 附近，但 HO 方案偏差最小。

场景 3：负载阶跃减少

负载突降后总需求低于光伏出力，电池自动由放电转为充电吸收盈余功率；

HO 方案负载功率暂态约 0.015 s（全场最短），SC 稳定时间约 0.04 s；SOC 暂态凹陷更小、恢复更快。

场景 4：光照与负载同时变化（最严苛工况）

HO 方案光伏功率暂态约 0.021 s、电池功率约 0.035 s，均优于其他方法；

超调：光伏 40 W、SC 230 W；而经典 PI 分别高达 95 W 和 490 W——过大超调会加速器件老化。

稳态误差对比 (Table 6)

场景	指标	经典PI	FPI-PSO	FPI-TLBO	F2DOF-PI-HO
1	P_solar 误差	1.81%	1.76%	0.37%	0.21%
1	P_B 误差	1.54%	1.42%	1.12%	1.05%
2	P_load 误差	0.77%	0.74%	0.65%	0.59%
3	P_load 误差	1.08%	1.05%	0.83%	0.51%
4	P_solar 误差	0.25%	0.21%	0.19%	0.12%

所提方法在全部 4 个场景、3 个功率变量上均取得最低稳态误差。

稳定性与消融分析

- 渐进负载增加测试（60%→73%，Table 7）：经典 PI 在 65% 即失稳；FPI-PSO

在 68% 失稳；FPI-TLBO 在 71% 失稳；仅 F2DOF-PI-HO 在 71% 负载增加下仍保持稳定；73% 时所有方法失稳（即系统稳定极限）；

● 消融实验：未优化的常规 2DOF-PI 目标函数值为 5687.4，经 HO 优化后降至 5307.7，证实 HO 参数精炼过程对控制性能的直接贡献。

总体量化结论：峰值超调改善至少 15%，暂态持续时间缩短至少 10%（多数指标远超此下限）。

五、论文贡献与创新点

1. 提出 Fuzzy 2DOF-PI 新型控制架构：将模糊逻辑监督层与 2DOF-PI 控制器协同集成于全主动 HESS 的双双向变换器控制中。2DOF 结构允许设定值跟踪与扰动抑制解耦独立整定，这在现有 HESS 模糊-PI 设计中极为罕见（此前几乎全部为 1DOF 结构）；

2. 首次将 HO 算法引入直流微电网领域：用 2024 年提出的河马优化算法离线整定控制器参数，以 ISE 复合目标函数同时优化母线电压、SC 电流和电池电流三项误差，收敛速度和解质量均优于 PSO 与 TLBO；

3. 精细化的频率解耦+误差补偿机制：LF/HF 分频分配之外，引入速率限制器适配电池慢动态，并将电池跟踪误差实时折算为 SC 补偿电流（式(15)-(16)），显著减轻电池电流应力、延长寿命；

4. 详尽的对比与验证体系：四种工况场景 + 稳态误差量化表 + 渐进负载稳定性边界测试 + 消融实验，全面覆盖超调、暂态时间、稳态精度、鲁棒性四个维度，且明确声明理想化假设以保证公平比较；

5. 显著的综合性能提升：所有场景峰值超调至少降低 15%、暂态时间至少缩短 10%，最优工况下电池功率超调降低近 80%（70 W→15 W），稳定裕度从 65% 负载增加扩展到 71%。

六、局限性与展望

缺乏实验/HIL 验证：论文在结论中坦承所有结果仅基于仿真，尚未进行实验或硬件在环（HIL）测试，实际工程中的开关损耗、噪声、延迟等非理想因素影响未知；

未考虑器件老化：电池退化与 SC 老化未建模，长期运行下的性能衰减未评估；

理想化仿真条件：SOC 估计误差未纳入——作者将其列为未来工作的重点，计划引入基于观测器的 SOC 估计技术和敏感性分析，评估其对功率分配精度、保护约束执行和系统

稳定性的影响；

不确定性感知与自适应控制缺失：当前控制器参数为离线一次性整定，未来需向不确定性感知和自适应控制方向增强，以适应实际运行工况的漂移；

模糊规则的静态性：虽然模糊层由 HO 优化了参数，但 49 条规则集本身仍为预先设计，未探索自学习类方法（如强化学习）的动态规则生成。

七、总结

本文针对独立光伏-混合储能直流微电网的功率管理难题，提出了一种模糊逻辑 + 2DOF-PI + 河马优化算法三位一体的控制方案。系统采用并联全主动 HESS 拓扑，电池与 SC 各经双向 Buck-Boost 变换器接入母线；控制层以低通滤波+速率限制实现 LF/HF 功率解耦，并以 SC 实时补偿电池跟踪误差；参数整定层面首次在直流微电网中应用 HO 算法，以 ISE 复合目标函数获得优于 PSO 和 TLBO 的最优解（适应度 5307.7）。MATLAB/Simulink 四场景仿真表明：该方案在所有场景下峰值超调至少降低 15%、暂态时间至少缩短 10%，电池功率超调最高降幅近 80%，稳态误差全面最低，且是唯一在 71% 负载增加下仍保持稳定的方法。该研究为 PV-HESS 直流微电网提供了一种无需精确数学模型、动态响应优异且鲁棒性强的功率管理方案，其实时化实现与不确定性感知控制是明确的后续方向。

论文信息

论文标题：Enhanced power management in PV-Integrated hybrid energy storage systems using fuzzy 2DOF-PI control optimized by hippopotamus algorithm

作者：Hossam Kotb✉、Ahmed G. Khairalla、Hesham B. ElRefaie、Kareem M. AboRas

作者单位：埃及亚历山大大学工程学院电气工程系（Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria 21544, Egypt）

通讯作者：Hossam Kotb (hossam.kotb@alexu.edu.eg)

期刊：Scientific Reports

卷/文章号：(2026) 16:9200

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40106-4>

收稿日期：2025年12月19日

接收日期：2026年2月10日

许可协议：Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

基金资助：开放获取资助来自埃及科学技术创新资助局 (STDF) 与埃及知识库 (EKB) 合作项目

作者贡献：Hossam Kotb——概念化、方法学、监督、审稿与编辑；Ahmed G. Khairalla——软件、验证、形式分析、初稿撰写；Hesham B. ElRefaie——调研、数据整理、可视化；Kareem M. AboRas——资源、概念化、方法学、监督、审稿与编辑

关键词：Photovoltaic systems, Hybrid energy storage, Fuzzy logic control, 2DOF-PI controller, Hippopotamus optimization, Battery-supercapacitor management, DC microgrid, Power management system, Renewable energy integration

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/uHBe2cEVPOukbJJKN6QFAQ>

【前沿技术】

颠覆性突破！全球首款柔性水泥基超级电容器问世： 会发电的“墙面”让建筑变身巨型电池



济南大学联合多所高校研发出可弯曲、可储能的柔性水泥基超级电容器，为未来自由形态建筑提供一体化能源解决方案

引言

在全球“双碳”战略目标的引领下，传统能源系统向清洁能源转型已成为世界共识。然而，光伏、风电等绿色能源存在固有的不稳定性与间歇性，制约了可再生能源电力的高效利用。因此，亟需开发先进的储能材料，既能存储可再生能源，又能按需释放。

在此背景下，基于水泥基体的超级电容器受到日益广泛的关注。这类器件不仅能提供可

观的储能容量，还能作为建筑材料的组成部分发挥作用——这种储能功能与建筑功能的融合，标志着绿色多功能建筑材料领域的重要里程碑。

水泥基超级电容器巧妙利用水泥固有的多孔网络，促进电解质离子的传输和存储，实现高效的电能存储。典型的器件由两个集流电极和中间的电解质层构成，电解质层既作为离子导体，又作为移动离子的来源。总电容主要来源于两种机制：电极表面离子吸附产生的双电层电容，以及电极-电解质界面可逆氧化还原反应贡献的赝电容。

然而，当前水泥基集成储能研究仍主要集中在刚性体系，缺乏柔韧性，无法贴合曲面或可变形表面。与此同时，建筑与工程设计的进步正日益推动自由形态、非平面结构的发展（如墨西哥曼南蒂阿莱斯餐厅等标志性建筑）。柔性水泥基超级电容器有望提供卓越的变形适应性和多功能性——它们可以贴合各种曲面结构作为保护层，同时提供集成储能功能，且无需对既有建筑进行结构改造。尽管如此，这类柔性水泥超级电容器的开发仍基本处于空白，主要原因是缺乏合适的柔性水泥基电解质，以及在机械变形下保持高电化学性能的挑战。

研究亮点

针对上述瓶颈，本研究首次报道了一种柔性水泥基超级电容器（FCS），采用非对称柔性电极结构——泡沫镍/还原氧化石墨烯（NF/rGO）和NF/rGO/ α - Fe_2O_3 ——以及柔性水泥基复合电解质（水泥-PAM-KOH）。通过优化丙烯酰胺（AM）含量，电解质实现了35.28 mS/cm的高离子电导率，这得益于富含介孔和毛细孔的多孔结构设计，同时展现出优异的柔韧性，杨氏模量低至81.6 MPa。

组装的FCS器件实现了215.3 mF/cm²的面电容、76.55 $\mu\text{Wh}/\text{cm}^2$ 的能量密度和726.95 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的功率密度，在2000次循环后电容保持率达83.3%。该器件在-10至65°C的宽温度范围内稳定工作，能承受机械损伤而不失效，提供7°C的隔热温差，且在户外暴露六个月后性能无明显衰减。实际演示证实，FCS可有效存储太阳能，并在弯曲或扭曲条件下可靠地为LED、手机和小型风扇等电子设备供电。

一、柔性水泥基超级电容器的结构设计（图1）

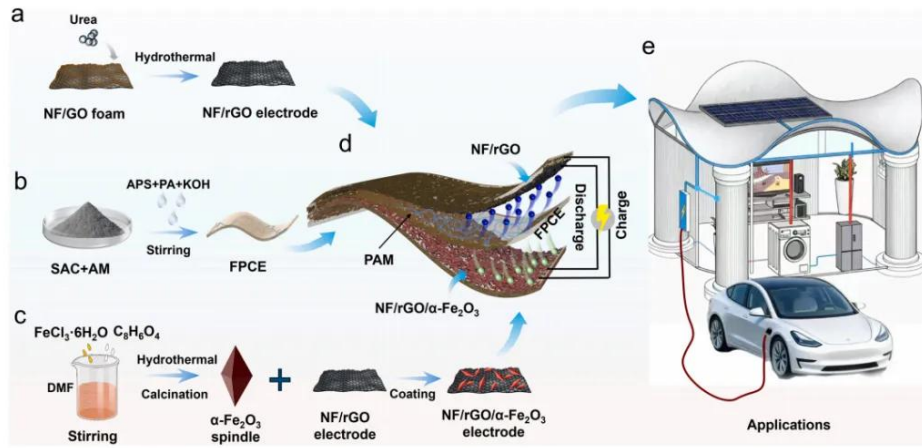


Fig. 1. Schematic of the fabrication process and envisioned applications of the FCS. (a) Hydrothermal preparation of the NF/rGO electrode. (b) Formulation of the FPCE. (c) Synthesis of the NF/rGO/α-Fe₂O₃ electrode. (d) Assembly of the asymmetric FCS device architecture. (e) Application scenarios of FCS as an integrated energy-storage component on a free-form architectural surface.

正极：通过水热自组装制备柔性泡沫镍/还原氧化石墨烯（NF/rGO）复合材料。rGO锚定在NF骨架上，同时增强了导电性和比表面积（图1a）。

电解质：采用硫铝酸盐水泥（SAC）、聚丙烯酸酯乳液（PA）、丙烯酰胺（AM）和氢氧化钾（KOH）配制柔性聚合物/水泥基复合电解质（FPCE）（图1b）。

负极：将纺锤形α-Fe₂O₃纳米材料涂覆在NF/rGO基底上，构建NF/rGO/α-Fe₂O₃电极（图1c）。

器件组装：采用垂直堆叠构型NF/rGO|FPCE|NF/rGO/α-Fe₂O₃组装非对称柔性水泥基超级电容器（图1d）。

应用场景：概念验证演示展示了其作为非平面建筑储能组件的潜力，可通过太阳能为家用设备供电，同时保持建筑涂层的防护功能（图1e）。

二、电极的微观结构与电化学表征（图2）

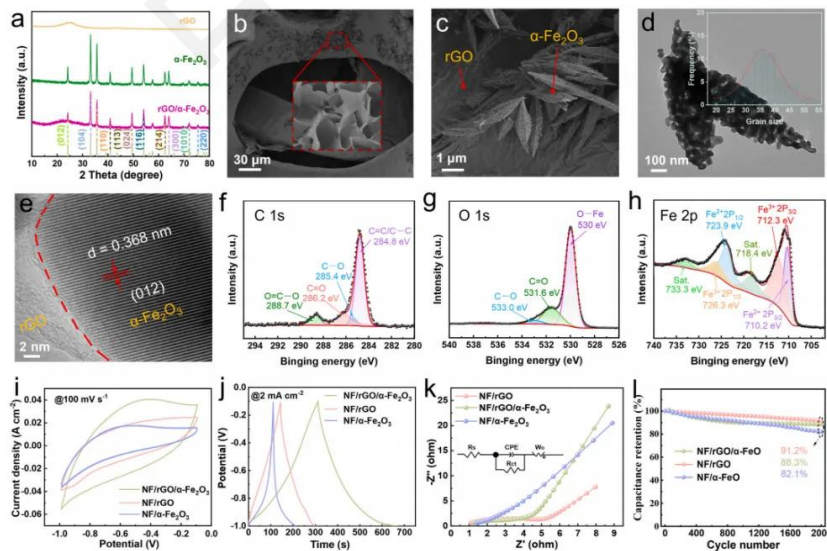


Fig. 2. Microstructure and electrochemical characterization of the electrodes. (a) XRD patterns of rGO, α-Fe₂O₃, and rGO/α-Fe₂O₃. (b) SEM image of NF/rGO. (c) SEM image of NF/rGO/α-Fe₂O₃. (d,e) HRTEM images showing (d) the spindle-like α-Fe₂O₃ nanostructure and (e) the interface between rGO and α-Fe₂O₃. (f-h) XPS spectra of rGO/α-Fe₂O₃. (i) CV curves of NF/rGO, NF/α-Fe₂O₃, and NF/rGO/α-Fe₂O₃. (j) GCD curves of NF/rGO, NF/α-Fe₂O₃, and NF/rGO/α-Fe₂O₃. (k) Nyquist plots derived from EIS measurements. (l) Cycle stabilities over 2000 cycles for NF/rGO, NF/α-Fe₂O₃, and NF/rGO/α-Fe₂O₃ electrodes.

物相分析 (图2a) :

rGO在约 24° 处呈现宽衍射峰, 对应 (002) 晶面, 证实了水热处理过程中的有效还原
 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 所有衍射峰均可指标化为菱方晶体结构 (PDF#33-0664)

复合物中仅观察到rGO和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的特征峰, 表明各组分晶体结构在复合后保持完整
微观形貌 (图2b-e) :

NF/rGO电极 (图2b) : rGO涂层覆盖泡沫镍表面和骨架空隙, 保留rGO特有的褶皱纹理, 片层间间隙直接增加了电极的表面粗糙度

NF/rGO/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合电极 (图2c) : $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料均匀涂覆在NF/rGO基底上, 作为氧化还原活性组分

HRTEM图像 (图2d-e) : $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 呈现纳米多孔纺锤形貌, 由平均尺寸35 nm的互连椭圆纳米颗粒组成。rGO与 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 之间可见清晰界面, 晶格间距0.368 nm对应 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 (012) 晶面

XPS化学态分析 (图2f-h) :

C 1s谱 (图2f) : C-O和C=O峰显著弱于C=C/C-C峰, 与GO脱氧还原为rGO一致

O 1s谱 (图2g) : 呈现明显的Fe-O峰, 证实 Fe_2O_3 的存在

Fe 2p谱 (图2h) : 在约710和724 eV处显示两个主峰, 分别对应Fe 2p_{3/2}和Fe 2p_{1/2}。解卷积显示四个组分峰及两个卫星峰, Fe^{2+} 的检测表明合成过程中 Fe^{3+} 发生了部分还原

电化学性能 (图2i-l) :

CV曲线 (图2i) : NF/rGO/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 电极的积分面积显著大于NF/rGO和NF/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 表明更高的比电容

GCD曲线 (图2j) : NF/rGO/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 表现出更长的放电时间

性能增强源于协同效应: NF/rGO骨架贡献的双电层电容 (EDLC) 和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 可逆 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 氧化还原反应的赝电容

EIS分析 (图2k) : NF/rGO/ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 电极具有低内阻 ($R_s = 1.25 \Omega$) , 证实rGO对电导率的提升

循环稳定性 (图2l) : 2000次循环后保持88.3%的初始电容

三、柔性聚合物/水泥基复合电解质的性能优化 (图3)

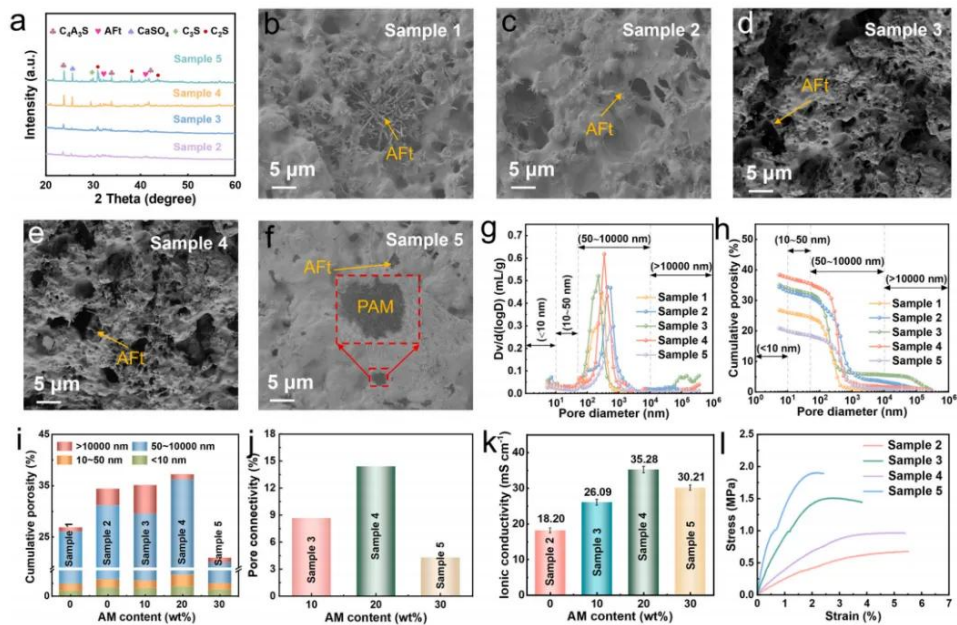


Fig. 3. Structural and electrochemical characterizations of Samples 1-5. (a) XRD patterns. (b-f) SEM images. (g) Pore-size distribution. (h) Cumulative porosity. (i) Porosity distribution across different pore-size ranges. (j) Pore connectivity of Samples 3-5. (k) Ionic conductivities of Samples 2-5. (l) Tensile stress-strain curves.

水化产物分析（图3a）：

所有水泥基复合材料中，钙矾石（AFt）为最主要水化产物

同时检测到未水化相——无水硫铝酸钙（ C_4A_3S ）、阿利特（ C_3S ）和贝利特（ C_2S ）的特征衍射峰

随AM含量增加，未水化相衍射峰增强，而AFt峰减弱——表明AM延缓了水泥水化动力学，但不改变水化产物类型

微观结构演变（图3b-f）：

Sample 1（水泥-PA，图3b）：由针状AFt和PA包裹的未水化相构成的多孔结构

Sample 2（水泥-PA-KOH，图3c）：KOH的加入增大了孔径，离子电导率为18.20 mS/cm

Sample 3（10 wt% AM，图3d）：大量 $>10,000$ nm的大孔，归因于PAM对水泥水化的抑制，导致凝胶网络碎片化和离子传输通道不连续

Sample 4（20 wt% AM，图3e）：大孔和AFt相显著减少， <50 nm介孔大幅增加。PAM在延缓水化和填充大孔方面的双重作用使整体孔结构更细化，形成贯穿基体的连续PAM网络，为 K^+ 和 OH^- 离子快速传输提供互连通道

Sample 5（30 wt% AM，图3f）：孔数量明显减少，因过量PAM的广泛孔隙填充

孔隙结构定量分析（图3g-j）：

孔径分布 (图3g) 和累积孔隙率 (图3h)

总孔隙率及不同孔径范围分布 (图3i) : Sample 4的介孔 (10-50 nm) 和毛细孔 (50-1000 nm) 占比最高

孔隙连通性 (图3j) : Sample 4具有最高的14.4%孔隙连通性

离子电导率与力学性能 (图3k-l) :

EIS分析 (图3k) : Sample 4阻抗最低 ($22.6\ \Omega$) , 离子电导率最高 ($35.28\ \text{mS/cm}$)

拉伸测试 (图3l) : Sample 4断裂伸长率最高, 杨氏模量低至 $81.6\ \text{MPa}$

四、FCS器件的电化学性能 (图4)

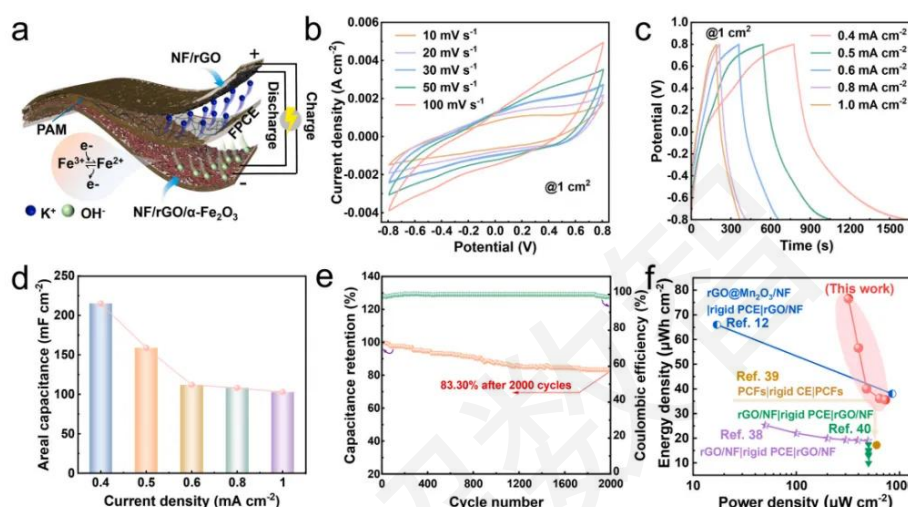


Fig. 4. Electrochemical performance of the NF/rGO|FPCE|NF/rGO/α-Fe₂O₃ supercapacitor (active area of 1 cm²). (a) Schematic of the FCS device architecture, comprising the NF/rGO/α-Fe₂O₃ positive electrode, the FPCE electrolyte, and the NF/rGO negative electrode. (b) CV curves measured at different scan rates. (c,d) GCD curves obtained at various current densities and the corresponding areal capacitance. (e) Cycling stability of the FCS over 2000 cycles. (f) Comparison of the energy density and power density of our FCS with values reported in previous studies [12,38-40].

器件构型 (图4a) : 非对称柔性设计, 三明治结构

CV曲线 (图4b) : 呈现非矩形形状, 源于Fe²⁺ /Fe³⁺ 氧化还原对的赝电容贡献。即使在100 mV/s高扫描速率下仍保持良好CV形状, 证明优异的电化学可逆性

GCD与面电容 (图4c-d) :

在0.4 mA/cm²电流密度下面电容高达215.3 mF/cm²

在1 mA/cm²时仍保持超过100 mF/cm²

循环稳定性 (图4e) : 0.6 mA/cm²下2000次循环后电容保持率超过83.3%

性能对比 (图4f) : 本研究器件的能量密度 ($76.55\ \mu\text{Wh/cm}^2$) 和功率密度 ($726.95\ \mu\text{W/cm}^2$) 显著优于近期报道的其他水泥基超级电容器能

五、热学与力学耐受性 (图5)

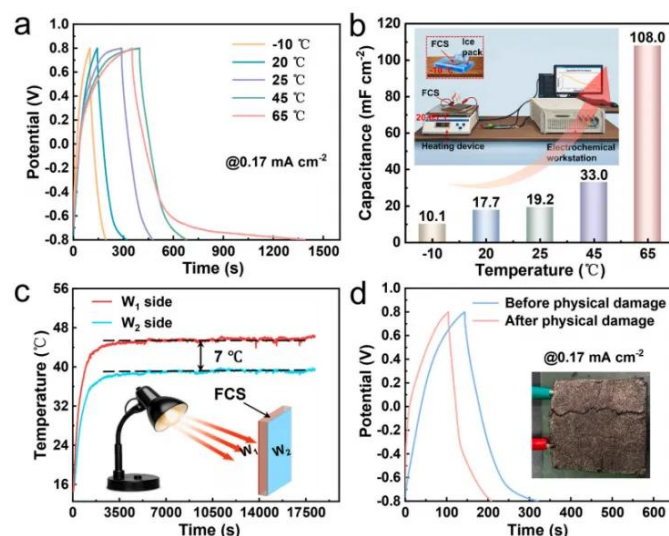


Fig. 5. Thermal/mechanical tolerance of the FCS. (a) GCD curves and (b) the corresponding areal capacitances measured across a wide temperature range (-10 to 65°C); the test configuration is shown in the inset. (c) Thermal insulation performance of the FCS, with the experimental setup illustrated in the inset. (d) GCD curves recorded before and after the device was subjected to physical fracture.

宽温域性能 (图5a-b) :

在-10至65°C范围内测试GCD曲线

-10°C (冰袋测试) 仍保持10.1 mF/cm^2 的电容, 证实可靠的低温运行能力

65°C时电容显著升至108.0 mF/cm^2 , 归因于高温下离子迁移率增强

隔热性能 (图5c) :

热导率0.53 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$

白炽灯照射下从2000秒起维持稳定的7°C温差, 并在整个加热过程中持续

该隔热能力有助于维持室内热舒适, 降低温控能耗

机械损伤耐受 (图5d) :

机械断裂后电容从17.7 mF/cm^2 降至10.8 mF/cm^2 , 主要由于有效电极面积损失

重要的是, FCS在受损后仍能保持电化学反应功能

六、实际应用与长期稳定性 (图6)

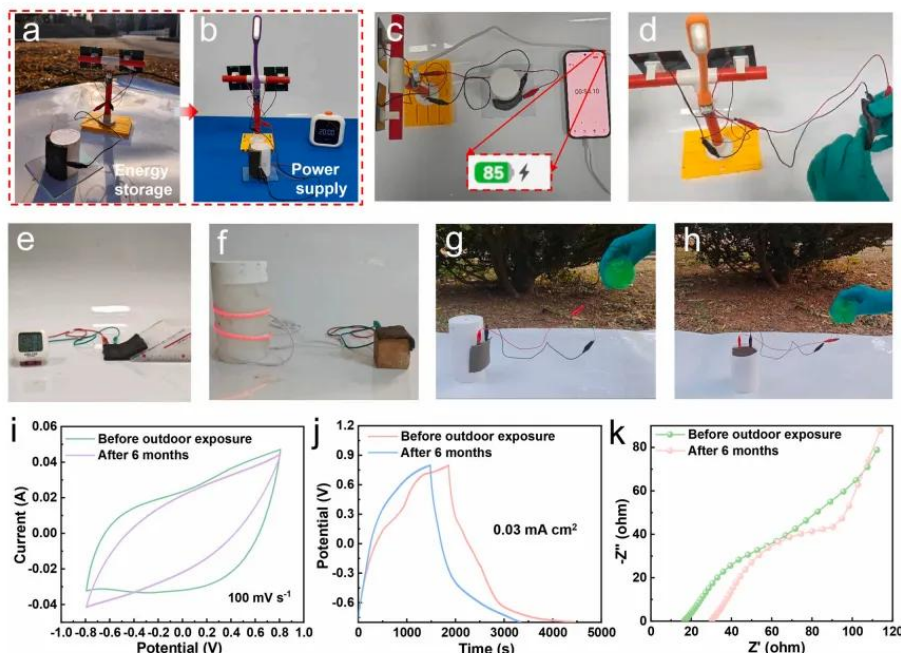


Fig. 6. Practical energy-storage demonstrations and long-term performance of the FCS. (a,b) Powering a commercial LED with a 36 cm² FCS attached to a cylindrical surface, following solar charging. (c) Operating a mobile phone using the FCS mounted on a cylindrical surface. (d) Lighting a commercial LED with the FCS under twisting. (e,f) Lighting an LED display and LED tape light with the FCS under 30° and 90° bending, respectively. (g,h) Driving a small fan with the FCS mounted on the (g) outer and (h) inner surfaces of the cylinder after six months of outdoor exposure. (i-k) Comparisons of (i) CV curves, (j) GCD profiles, and (k) EIS Nyquist plots for the FCS before and after the six-month outdoor exposure.

规模化制备（图6a-b）：

通过串联或并联连接多个FCS单元可灵活调节输出电压和电容

集成的FCS模块（6个串联）可实现5.4 V的工作电压，成功为智能手机充电（图6c）

柔性展示（图6d-e）：

在不同弯曲角度（0°、30°、60°、90°、120°、150°）下测试

即使在180°折叠后GCD曲线也无明显变化

500次弯曲循环后仍保持稳定性能

实际供电演示（图6f-i）：

在弯曲状态下成功点亮LED灯（图6f）

为小型风扇供电（图6g）

为手机充电（图6h）

在曲面基底上点亮LED灯（图6i）

户外暴露测试（图6j-k）：

六个月户外暴露后无明显性能衰减

EIS分析（图6k）：Rs从16.7 Ω增至30.2 Ω（归因于水分流失降低PAM+KOH离子凝胶

的离子电导率)； R_{ct} 从16.0 Ω 增至35.3 Ω (由rGO电极电导率下降和活性材料部分脱落引起)

应用场景计算：

考虑典型三层住宅 (总面积100 m^2) 内外墙集成FCS，搭配16 m^2 屋顶硅太阳能电池阵列

充足日照下0.5小时可充满，储存约1.59 kWh电力——足以满足中国典型家庭基本夜间用电需求

结论

本研究成功开发了一种柔性水泥基超级电容器，采用非对称NF/rGO/ α - Fe_2O_3 |FPCE|NF/rGO构型。该器件实现了215.3 mF/cm²的高面电容、76.55 μ Wh/cm²的显著能量密度和726.95 μ W/cm²的功率密度，在2000次循环后电容保持率达83.3%，具备稳定的循环性能。器件在**-10至65°C**的宽温度范围内、反复弯曲和扭曲条件下、以及户外暴露六个月后均保持稳健功能，同时保留了水泥基材料固有的隔热性能 (7°C温差)。实际演示——为LED、手机和小型风扇供电——证实了其作为集成储能组件的可行性。

上述结果凸显了这种柔性水泥基超级电容器作为一种有前景的多功能储能元件，在先进自由形态建筑中的应用潜力，为可持续建筑环境的集成能源解决方案发展做出了贡献。

研究团队：济南大学山东省绿色与智能建筑材料重点实验室、济南大学信息科学与工程学院、澳大利亚伍伦贡大学超导与电子材料研究所

本推文仅对原文献进行简要分享，研究团队的相关信息已在开头注明，如有侵权或信息不准确之处，请通过后台联系

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2026.106789>

信息来源：https://mp.weixin.qq.com/s/_oXvHKhQNzWoZCi_N0A2Dg